

EL ACUEDUCTO DE ALMUÑÉCAR

- **Almuñécar romana**

Almuñécar (*Sexi*) era famosa en la antigüedad púnica por sus salazones de pescado. Lo atestiguan varios autores, entre ellos el poeta Diphilus, nacido en Sinope, a orillas del Mar Negro, que triunfó con sus comedias costumbristas a finales del siglo IV a.C. en Atenas.

El fragmento de Diphilus lo recoge el gramático griego Ateneo de Naucrates en su obra: *Deipnosophistai* (Los gastrónomos)

"El mejor salazón del mundo es el de Amilcar (en el Peloponeso) y también el de Hispania, llamado Sexitano, pues es el más fino y el más dulce."

En tiempos de Roma, pese a participar en una sublevación turdetana contra el dominio romano, siguió manteniendo su carácter de emporio comercial e industrial. Su acueducto era parte importante de la estructura urbana, pues suministraba agua potable a la industria de salazón

- **Descripción de la traza**

Desde el punto de vista constructivo, este acueducto es quizá el más "completo" de los acueductos que los romanos hicieron en *Hispania*.

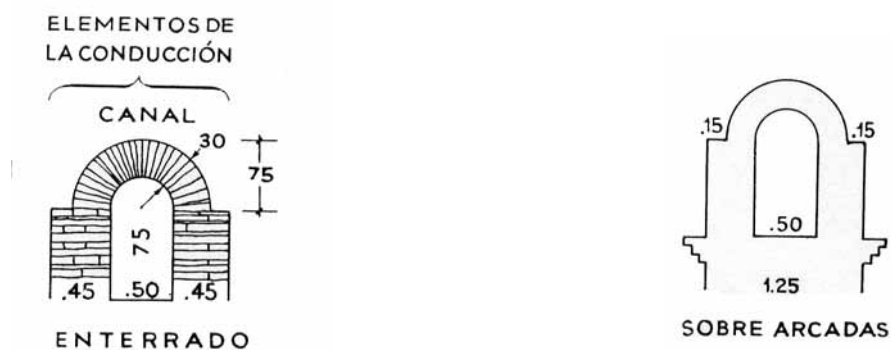
El origen del acueducto está en una obra subterránea de captación de aguas en el lugar llamado "Las Angosturas", en el cauce del río Verde, cerca del pueblo de Jete, aunque había restos de un murete de protección en un barranco anterior, conocido como "De Antequera".

A unos 3 m de profundidad en el lecho del río se inicia un canal abovedado de obra seca de 1,10 m de alto y unos 50 cm de ancho, realizado con lajas de pizarra y cantos de río, revestido en el suelo y paredes hasta unos 45 cm de altura para conseguir estanqueidad. La longitud de esta zona de captación es de unos 500 m. Para facilitar la captación se construyeron dos canales formando una "T" con el canal principal descendente. En la confluencia de estos canales hay un registro. (**Molina Fajardo F.** *Almuñécar romana*)

Acueductos romanos de Hispania

La orografía del terreno es muy accidentada, por lo que el cauce se entierra en ocasiones para salvar los barrancos, y cuando aflora, lo hace sobre muretes o sobre arcadas. Los registros del mismo están espaciados regularmente, siendo de forma circular, con 85 cm de diámetro interior, estando colocados a la entrada y a la salida de las obras destacadas, generalmente coincidiendo con cambios de dirección, promediándose a intervalos de unos 100 m. (**F. Casado C.** *Acueductos romanos en España*)

Un hecho interesante de este acueducto, es que la obra va en todo momento cubierta por una bóveda, tanto en las obras elevadas, como cuando discurre pegado al terreno, aunque su factura varía cuando va enterrado a cuando va sobre arcadas.



El primer barranco se salva con un muro y posteriormente, con arcadas, el de Torrecuevas. En las siguientes barrancas vuelve a aflorar la obra.

Se abandona la cuenca del río Verde mediante un túnel de 350 m. llegando a la del río Seco, apareciendo casi al nivel del cauce.

Es de señalar que este túnel está perforado precisamente en el punto donde los dos cauces de los ríos Seco y Verde están más próximos, señal inequívoca de la efectividad del sistema topográfico romano. Este hecho, habida cuenta de la dificultad que entraña hacer un cálculo semejante con los instrumentos de que hoy en día disponemos, constituye todo un alarde de precisión y dominio de la técnica, y le da un carácter de excepcionalidad a ésta conducción.

El canal, enseguida se separa del cauce del río Seco, y después de desarrollarse en una amplia vaguada, cruza el barranquillo siguiente mediante un arquito muy pegado a la ladera. Continúa en muro sobre ésta ladera, y posteriormente enlaza con tres obras elevadas.

Acueductos romanos de Hispania

A unos 100 m de la salida del tercer acueducto, el canal cambia en ángulo recto, y a unos 200 m aparece una arqueta circular.

Quedan 1.100 m hasta el depósito final, y 9 m. en descenso, con una depresión de 38 m Esta depresión se salva con un sifón, que empieza justo en la arqueta circular, de 4,20 m de diámetro

En el sifón cambian las medidas, siendo de 1,60 m de alto y 70 cm de ancho. En el fondo transcurre una tubería formada por piezas cerámicas de 34 cm de largo, 20 cm de diámetro exterior y 16 cm de diámetro interior.

Hay en esta conducción un total de 8 acueductos de arcadas, aunque sólo 5 son dignos de estudio, siendo los otros arcos muy pequeños, sencillos y de escasa importancia.

En 4 de ellos se aprecia una verdadera normalización de sus dimensiones características, siendo la luz de los arcos principales 4,90 m y 2,80 m la de los secundarios del piso inferior, cuando los hay.

Los pilares son de sección cuadrada, de 1,80 x 1,80 m y cuando su altura pasa de 5 m (más o menos el triple de su dimensión transversal) se enlazan entre sí mediante un segundo cuerpo en la zona inferior.

Otra cosa que se aprecia en la construcción de los acueductos de dos pisos es la clásica construcción de arcadas de medio punto sobre cuadrado en las arcadas superiores. (*F. Casado C. Op.Cit.*)

• Acueducto de Torrecuevas

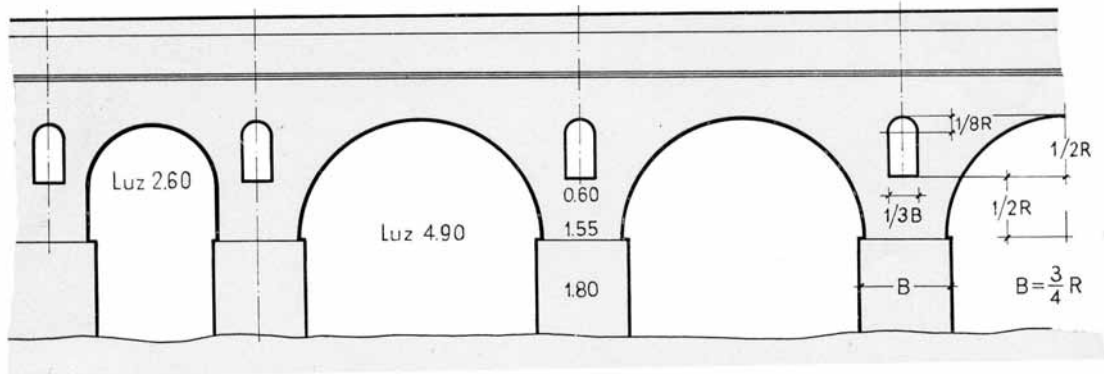
El primer tramo elevado sobre arcadas (llamado acueducto de Torrecuevas) presenta unos aligeramientos en los tímpanos, que evidentemente no responden a un carácter utilitario, pues en realidad lo que hacen es complicar la construcción, ya que el aligeramiento es mínimo. Además debe tenerse en cuenta que el material empleado en la construcción es pizarra, (y de no muy buena calidad), de la que resulta bastante complicado obtener piezas regulares.

Sólo hay dos arcos desiguales en el conjunto.



Acueductos romanos de Hispania

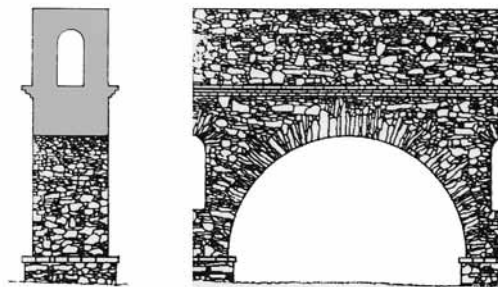
La modulación de este acueducto es la siguiente:



No sabemos exactamente el porqué de esta desigualdad en los arcos, porque ni siquiera están situados en el centro del acueducto.

Sobre él va situada la conducción del canal, cubierto.

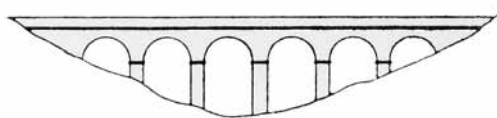
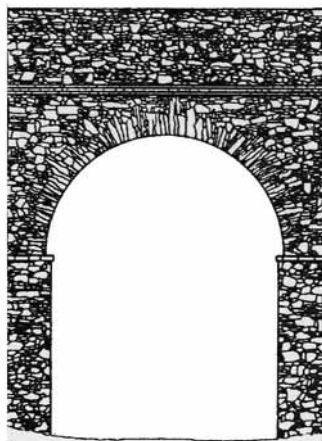
Las dimensiones interiores son las mismas que las de el tramo enterrado, es decir: 50 cm. de anchura y 1,10 m. de altura total, siendo la parte superior semicircular. Esta sección del canal se mantendrá constante en todo el tramo del canal, elevado o no, hasta llegar a la arqueta del sifón.



Los otros acueductos, se denominan como Acueducto I, II, III y IV, siendo el llamado Acueducto IV el *venter* del sifón. Llamado también Acueducto de "La Carrera".

- **Acueducto I.**

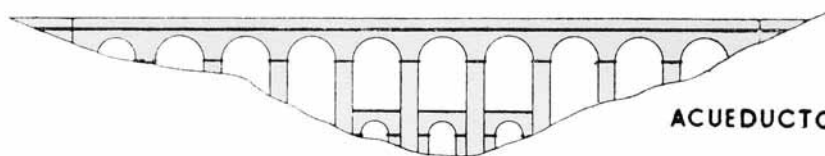
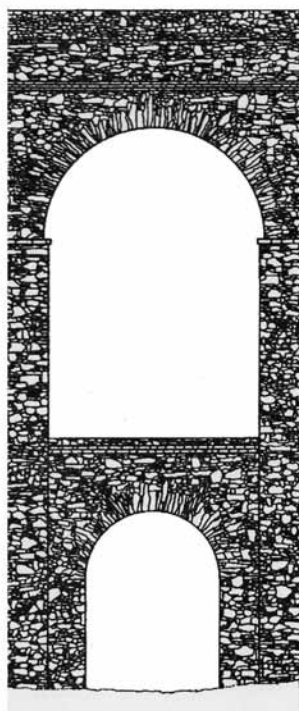
Este acueducto atraviesa una vaguada, siguiendo una modulación regular de 4,90 m. de luz.



ACUEDUCTO I

- **Acueducto II.**

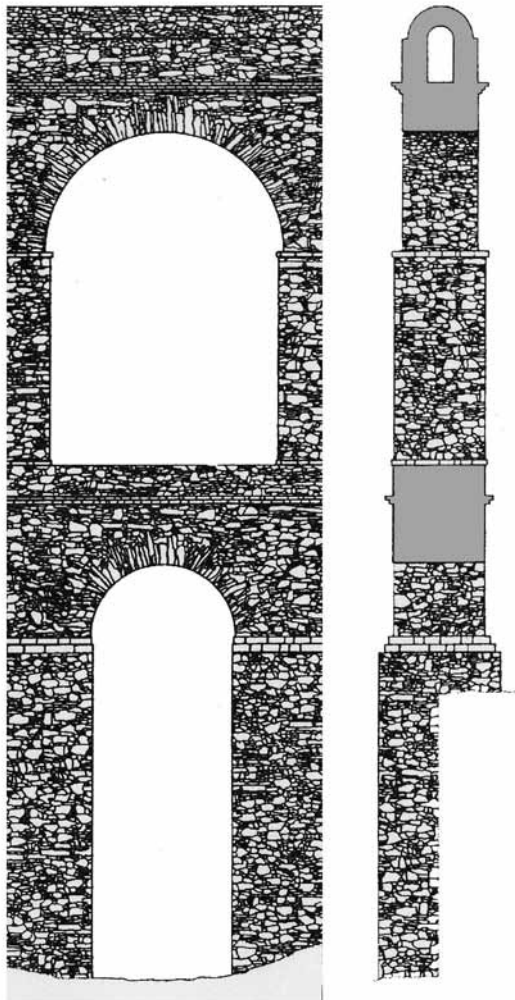
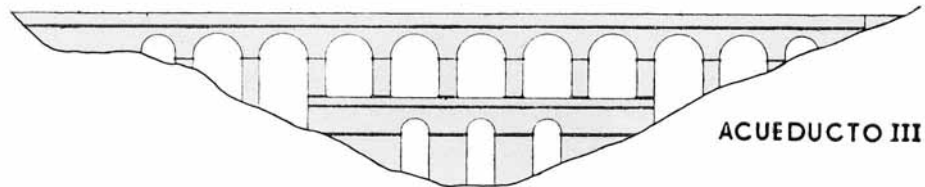
Este acueducto presenta ya una doble fila de arcadas, teniendo los arcos inferiores una estructura distinta que los superiores, pues su finalidad no es otra que servir de contrafuerte lateral a los que soportan el canal por arriba y están apoyados en el terreno por debajo.



ACUEDUCTO II

• Acueducto III

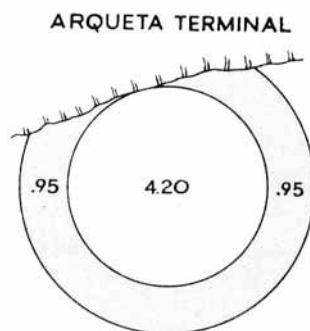
El acueducto III tiene dos registros situados muy cerca de ambos extremos, el 1º circular y el 2º cuadrado, siendo este el único cuadrado de toda la conducción. En cuanto a la técnica y los materiales, son similares a los acueductos anteriores.



Vemos que la estructura de este acueducto es algo distinta a la de los anteriores, teniendo los pilares inferiores un macizado mayor. Posiblemente se debiera este hecho a que las avenidas en el barranco donde se asienta fuesen tan grandes que aconsejaran este tipo de refuerzo en la base. (**Molina Fajardo. F. Op. Cit.**)

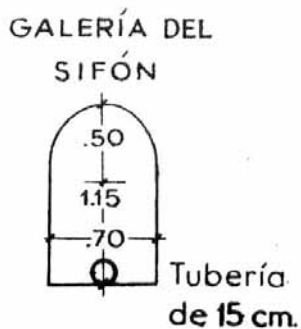
La parte superior presenta la modulación clásica que ya hemos visto, de semicírculo sobre cuadrado.

A unos 70 m. del final de éste acueducto hay un depósito que quizás pudo sustituir a uno romano anterior. A 6 m. del depósito hay un registro, y a 46 m. otro. Finalmente, a 60 m. hay una arqueta circular de 4,2 metros de diámetro que pudo ser la arqueta final de la conducción rodada, dando ahí inicio el sifón.



• El sifón

El sifón parte de la anterior arqueta y se dirige a la ciudad de forma rectilínea a través de unas tuberías de cerámica. El diámetro interior de estas tuberías es de 16 cm. No sabemos el motivo por el cual las hicieron de ese diámetro precisamente. Tal vez ya se había experimentado en conducciones anteriores ese diámetro y se habría comprobado su idoneidad.



El sifón va en una galería practicable de manera que en caso necesario pudiera repararse un tramo del mismo, y localizar rápidamente el lugar de una posible rotura o fuga del caudal.

La altura de 1,65 m. y la anchura de 70 cm. permiten el paso de una persona con cierta comodidad. (*F. Casado C. Op.Cit.*)

En la parte más baja hay un *venter* horizontal para apoyar la tubería evitando a su vez las avenidas imprevisibles de una rambla seca habitualmente, pero con riadas peligrosas.

La altura de este *venter* es de unos 6 m. de manera que la presión máxima de la tubería corresponde a 32 m.

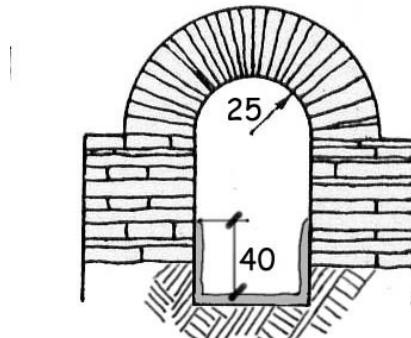
Este *venter* tiene un sólo cuerpo de arcadas, pero la modulación de las mismas no se corresponde con la de los anteriores, ya que las luces de los arcos son de 4,15 m. Uno de los arcos tiene una luz de 4.20m. con dos finas pilastras adosadas sobre los pilares en ambas caras. Posiblemente pasara por debajo la vía romana que unía *Castulo* (Linares) con *Malaca* (Málaga) documentada en el Itinerario de Antonino. Seguramente, y dada la tosquedad de su fábrica, sea anterior a las otras *arcuationes*. En total tiene una longitud de aproximadamente 100 metros. (*F. Casado C. Op.Cit.*)

• Cálculo del caudal

La pendiente media del acueducto hasta la arqueta sifónica es del 0,4%.

A la hora del cálculo del caudal tenemos que hacer una consideración, que no es otra que la de tener en cuenta el hecho de que en la zona de captación de aguas, la profundidad de la parte revocada de *opus signinum* es de 45 cm. De esta manera estamos en disposición de decir que el calado máximo es de 40 cm.

Teniendo en cuenta que la anchura del canal es de 50 cm, y suponiendo un grosor medio del revoco de 5 cm. de espesor, tenemos un canal efectivo de paso de agua con unas dimensiones de 40 x 40 cm²



Con estos datos, los calados de cálculo serán:

- Calado máximo.....45 cm.
- Calado intermedio.....30 cm.
- Calado óptimo.....20 cm.

Acueductos romanos de Hispania

La tabla de caudales, en litros/s., quedaría de la siguiente manera:

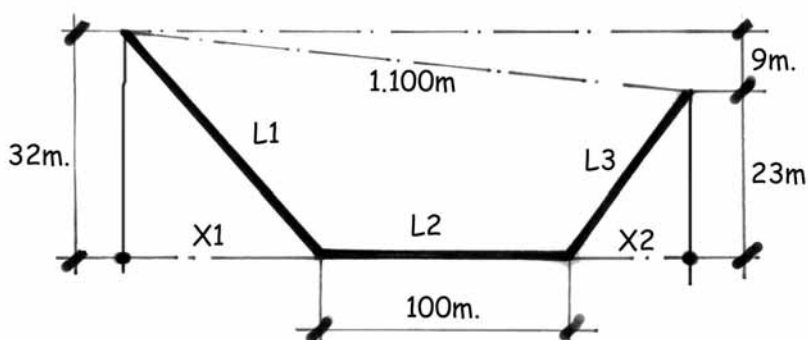
	Caudal máximo $y = 40 \text{ cm}$	Caudal intermedio $y = 30 \text{ cm}$	Caudal óptimo $y = 20 \text{ cm}$
$n = 0,017$	155,36	108,61	64,12
$n = 0,02$	132,05	92,33	54,5

Estos son los caudales que teóricamente llegarían a la arqueta de cabecera del sifón. Es significativo el hecho de que en la actualidad, la captación media que proporcionan en la cabecera las fuentes es de aproximadamente 50 litros/s. (**Molina Fajardo. F. Op Cit.**) Muy cerca del valor óptimo.

A continuación nos encontramos con el sifón.

Lo primero que hay que hacer para calcular el caudal que circula por el sifón es determinar parámetros como la longitud del mismo.

Básicamente podemos considerar al sifón como formado por dos hipotenusas de sendos triángulos rectángulos, unidas mediante un tramo recto. Esquemáticamente lo representamos como:



La longitud total será la suma de las tres longitudes parciales ($L1 + L2 + L3$)

Acueductos romanos de Hispania

Estos valores parciales son, suponiendo en una aproximación primera que:

$$X_1 = X_2 = 500 \text{ m.}$$

$$L_1 = \sqrt{32^2 + 500^2} = 501,23 \text{ m.}$$

$$L_2 = 100 \text{ m.}$$

$$L_3 = \sqrt{23^2 + 500^2} = 500,5$$

La longitud total será por lo tanto aproximadamente 1.101,55m.

A efectos de cálculo podemos suponer la longitud del sifón como de 1.101 m. con un error despreciable.

$$\Delta H = \frac{8 \cdot f \cdot L}{2 \cdot D^5 \cdot g} \cdot Q^2$$

A continuación usamos la ya referida ecuación de Darcy:
Siendo en este caso:

- $DH = 9 \text{ m.}$
- $L = 1.101 \text{ m.}$
- $D = 0,16 \text{ m.}$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Para el cálculo del factor de fricción "f" hallamos el N° de Reynolds, que como sabemos tiene de expresión:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Si sustituimos valores conocidos de diámetro y viscosidad, tenemos que el número de Reynolds toma la siguiente expresión:

$$Re = 160.000 \cdot v$$

Como resulta que el régimen laminar empieza a dejar de serlo cuando alcanza valores superiores a 40.000 está claro que en nuestro caso, siempre vamos a tener un régimen turbulento, sea cual sea la velocidad de la corriente.

El problema que se nos plantea aquí es el de que en la realidad no conocemos la velocidad del agua en la tubería. Sin embargo, en nuestro caso esta velocidad tiene un valor máximo que podemos calcular.

Acueductos romanos de Hispania

Para hallar esta velocidad máxima tenemos que recurrir al teorema de Bernoulli.

Según éste, si planteamos el equilibrio a la entrada y a la salida de un conducto, tenemos:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

En nuestro caso tendríamos:

- $P_1 = P_2$
- $v_1 \rightarrow 0$
- $h_2 = 0$

Por lo tanto tendremos:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Sustituyendo valores ya conocidos:

- $h = 9 \text{ m.}$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Tenemos finalmente un valor máximo de velocidad en la salida del sifón de

$$V = 13,28 \text{ m/s}$$

Este valor es el que tendría el agua en el caso de que no hubiese ningún tipo de rozamiento ni pérdida de carga en toda la conducción.

Si damos valores a la velocidad, desde el valor 1 m/s hasta los 13 m/s podremos obtener distintos valores del número de Reynolds para entrar en el diagrama de Moody y obtener así los distintos valores del factor de fricción.

Previamente debemos hallar el valor de la rugosidad relativa.

Como no conocemos la rugosidad absoluta de las tuberías del sifón, realizamos una estimación por medio de tablas.

En las mismas podemos ver que para el caso de un material como el cemento alisado (de rugosidad parecida a la de los tubos cerámicos) la rugosidad absoluta toma el valor de 0,8 mm. siendo por lo tanto la rugosidad relativa

$$\frac{0,8}{D} = \frac{0,8}{160} = 0,005$$

Con este valor de rugosidad relativa, y los valores del número de Reynolds podríamos hallar ya en cada caso el valor del coeficiente de fricción.

Vemos no obstante en el diagrama de Moody que los valores de la fricción que podemos obtener con los diferentes números de Reynolds obtenidos según los diferentes valores de la velocidad, en cualquier caso, están comprendidos entre 0,0325 y 0,0375.

Podemos tomar pues como factor de fricción estimado el valor

$$F = 0,0350$$

Si en la ecuación de Darcy despejamos el caudal, tenemos:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta H \cdot D^5 \cdot g}{8 \cdot f \cdot L}}$$

Finalmente, sustituyendo valores:

$$Q = \sqrt{\frac{9 \cdot 0,16^5 \cdot 9,81}{8 \cdot 0,035 \cdot 1,101}} = 0,0186 \frac{m^3}{s}$$

Lo que nos da finalmente un caudal de 18,6 litros/s.

Este caudal, en quinarias romanas sería de 40,2

• Consideraciones sobre el sifón

Vemos que el valor del caudal aportado por el sifón a la ciudad es bastante más pequeño que los aportados hasta la arqueta de cabecera por la canalización.

La causa de esto es fácil de entender. Al hacer el cálculo del agua necesaria para satisfacer unas determinadas necesidades, los ingenieros romanos debieron llegar a la conclusión que con unas tuberías de ese calibre conseguían la aportación requerida. Pero se necesitaba asegurar que en todo tiempo este caudal no variase. La forma de conseguirlo era hacer que el caudal de agua que llegara a la cabecera del sifón fuese sobreabundante, tanto en las épocas de lluvias como las de estiaje. De esa manera, se permitía que siempre, al ser las necesidades de agua de la ciudad más pequeñas que lo que llegaba a la cabecera, la aportación del acueducto fuese invariable. Este es un sistema parecido al que se empleaba en la ciudad de Segovia, como ya hemos visto. En este sentido, podemos asemejar la función del depósito que hay cerca de la cabecera del sifón, a la Casa de Piedra del acueducto de Segovia.

En la actualidad, nosotros resolvemos ese problema con la construcción de grandes embalses, que aseguran el suministro a las ciudades, algo que los romanos no podían hacer, pues carecían de la tecnología necesaria para llevarlos a cabo. Sin embargo, incluso nosotros no podríamos realizar esta función si no fuera por la presencia de plantas de potabilización química, que hacen aptas al consumo humano las aguas embalsadas. Cosa que los romanos, evidentemente no estaban en condiciones de realizar con los conocimientos de que disponían, por lo que debían recurrir a soluciones como las adoptadas en Almuñécar.

El agua restante se podía emplear para riego u otros usos. En este sentido resulta revelador el hecho de que en las cercanías de la arqueta de cabecera del sifón, según afirma Federico Molina Fajardo, se hayan encontrado restos de una canal que daría servicio a una villa romana de las proximidades, que aprovecharía de este modo los excedentes de agua.

• **La población**

Es de suponer que gran parte del agua que llegaba a la ciudad se emplease para usos industriales en las fábricas de salazón, por lo que realmente no estamos en condiciones medianamente reales de hacer un cálculo de la población que había en la ciudad.

Lo que si parece claro, es que parte del agua del acueducto se empleaba en el consumo humano. No era por lo tanto un acueducto únicamente industrial. Pues de haber sido así, no hubiera estado cubierto en todo momento. ¿Qué parte estaba destinada a las fuentes públicas? No lo sabemos.

Lo que sí podemos hacer es calcular la cantidad máxima de personas que pudieran ser abastecidas con el agua que llegaba a la ciudad. Es decir, imaginaremos que *Sexi* no fuese una ciudad industrial.

Suponiendo un consumo de 60 litros por habitante y día, y que se destinara a fuentes públicas un 14,77% del agua que entraba en la ciudad (como hemos supuesto en otras ciudades) tenemos 3.956 habitantes, a los que hay que añadir un 1,67% de patricios y personas que se servían directamente del acueducto.

En total, tenemos por lo tanto 4.023 habitantes para la ciudad de *Sexi*.

Acueductos romanos de Hispania

Tal vez esta cifra sea aproximada, tal vez no. Pero no sería descabellada tomarla como cifra de referencia, pues bien pudiera ser que por otras causas, diferentes a las otras ciudades (Aquí seguramente no habría muchas fuentes ornamentales) se destinase al consumo público un porcentaje parecido al estimado del 14,77% y que el resto, (más del 85%) se emplease en la tan lucrativa industria de la salazón de pescado.